

振動ローラ加速度応答を用いた 地盤剛性評価装置「 α システム」の開発

藤山哲雄¹・古屋弘²・高橋浩³・石黒健⁴・細谷芳巳⁵

¹正会員 工博 前田建設工業（株）技術研究所（〒179-8914 東京都練馬区旭町1-39-16）

²正会員 工博 （株）大林組 土木技術本部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）

³正会員 工修 前田建設工業（株）技術研究所（〒179-8914 東京都区旭町1-39-16）

⁴正会員 工博 前田建設工業（株）総合企画部（〒102-8151 東京都千代田区富士見2-10-26）

⁵正会員 工修 （株）大林組 土木技術本部（〒108-8502 東京都港区港南2-15-2）

現行の盛土締固め管理はRIや平板載荷試験等によることが一般的であるが、これらは離散的な測定であるため、施工面全体の品質を精度良く評価することが困難である。これに対し、転圧面の品質を面的かつリアルタイムに評価できる手法として、筆者らは振動ローラの加速度応答を利用した締固め管理手法（ローラ加速度法）に着目し、実用化に向けた一連の研究を進めてきた。本報告では、振動ローラ機械条件や土質条件の影響など、実用化に向けて明確にすべきローラ加速度法の適用課題に関するこれまでの知見について集約した後、筆者らの提案する地盤剛性評価手法を用いた実機搭載用の地盤剛性評価装置「 α システム」の概要と現場検証試験結果について述べている。

キーワード：振動ローラ, 加速度応答, 盛土, 締固め管理, 地盤剛性

1. はじめに

現行の盛土の現場締固め管理は、RIや砂置換による密度計測、あるいは平板載荷試験等による地盤剛性計測が一般的であるが、これらは離散的な測定であるため、施工面全体の品質を精度良く評価することが困難である。これを解決する方法の一つとして、振動ローラの加速度応答が地盤の締固めに応じて変化してくる現象を利用し、転圧中のローラ加速度計測から地盤の締固め程度を判定する手法（以下、ローラ加速度法という）が挙げられる。本手法を用いれば、転圧中にリアルタイムかつ面的に、信頼性設計に用い得る十分なデータを取得することができるため、現行の締固め管理を大きく合理化することが可能となる。

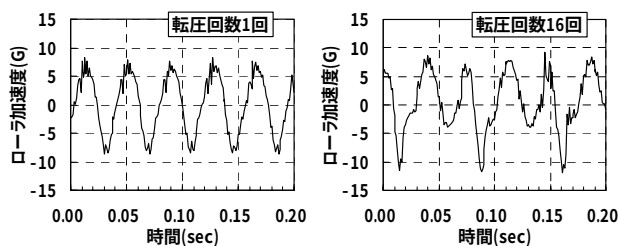
ローラ加速度法の研究の始まりは比較的古く、1980年頃から北欧で先行し¹⁾²⁾、ドイツなどでは既に仕様書³⁾に取り入られている。我が国でもほぼ同時期から研究⁴⁾⁵⁾が始められ、その後多くの機関で「締固め管理手法として適用可能性あり」と報告されているが、これまで本格的な実用化には至ってこなかった。この理由としては幾つか考えられるが、土質条件に関する適用範囲や、管理手法としての精度な

ど実務上明確にしておくべき課題が未解決であったことなどが挙げられよう。

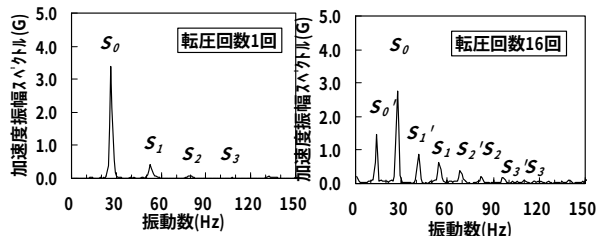
筆者らはこれまで、本手法の実用化を目的に、ローラ加速度に与える土質条件や振動ローラ機械条件の影響などを明らかにするための一連の研究^{6)~8)}を進めてきた。その結果、①従来締固め管理指標として一般的な密度とローラ加速度応答の関係は材料によって異なるが、地盤剛性は加速度応答と材料によらず一意的な関係にあること、②数値計算をもとにした検討から、振動ローラの機械諸元と加速度応答値から地盤剛性を定量的に算出できること、などを明らかにした。今回、これらの成果を踏まえて実機搭載用の地盤剛性評価装置（ α システム）の開発を行い、実現場への投入を図った。本報告では、これまで得られたローラ加速度法の適用性に関する知見について集約した後、開発したシステムの概要ならびに現場適用性の検証結果を報告するものである。

2. 振動ローラ加速度応答による地盤剛性評価手法の概要

筆者らが提案する振動ローラ加速度応答を利用し



(a) 加速度時刻歴



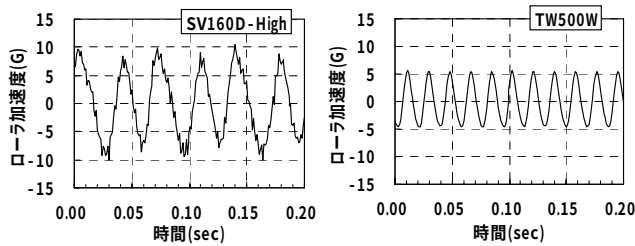
(b) 周波数分析結果

図-1 転圧にともなう加速度波形の計測例
(道路路体材料，転圧機種：酒井重工業 SV510D)

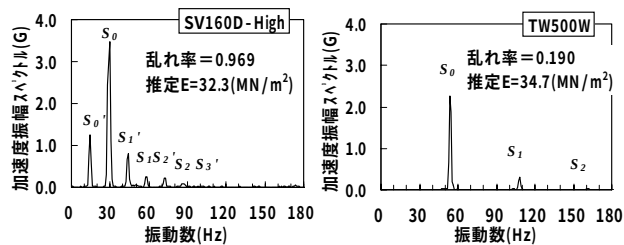
$$\text{乱れ率} = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i + \sum_{i=1}^3 S_i'}{S_0 + S_0'} \cdot \frac{F}{(m_1 + m_2)g} \quad (1)$$

た地盤剛性評価手法⁶⁾の概要を以下に述べる．図-1はある道路路床材の転圧試験により得られた振動ローラ加速度波形とその周波数分析結果の一例である．図に示すように，転圧の進行による地盤剛性の増加にともない，地盤からの反発を受けることにより振動ローラの加速度波形が乱れ，その周波数分析結果においては高調波スペクトル $S_1, S_2, S_3, S_4, \dots$ ，さらには1/2分数調波スペクトル $S_0', S_1', S_2', S_3', S_4', \dots$ が卓越してくることがわかる．この性質を利用し，加速度波形の定量指標として式(1)に示す「乱れ率」を定義する．すなわち，乱れ率が大きいほど地盤が締固まっていることを表す．

従来の報告では，上記のように振動ローラの加速度応答を何らかの形で定量化し，これと地盤密度や剛性との相関が転圧試験で得られることを示したものが多く，しかし，実施工への適用を考えた場合，後述する材料変化の影響，および振動ローラ機械条件の影響を考慮しておく必要がある．図-2は同一地盤上にて振動させた重量4t級の小型振動ローラ（酒井重工業TW500W）と18t級の大型振動ローラ（酒井重工業SV160D）の加速度波形を比較したものであるが，明らかに波形が異なり，乱れ率の値も異なることがわかる．すなわち，現場で複数機種を使用する場合，全ての機種について転圧試験を行う必要が出てきてしまう．これに対し藤山・建山⁶⁾は，振動ローラ～地盤系を図-3に示す2自由度振動モデルに置

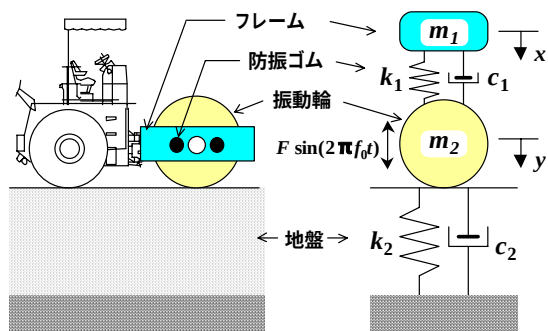


(a) 加速度時刻歴



(b) 周波数分析結果

図-2 同一地盤上における2機種の加速度波形の比較
(C-40 砕石，転圧機種：酒井重工業 TW500W と SV160D)



(a) 振動ローラ

(b) 数値計算モデル

$$\begin{aligned} m_1 \ddot{x} + k_1(x-y) + c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_1 g \\ m_2 \ddot{y} + k_2 y + c_2 \dot{y} - k_1(x-y) - c_1(\dot{x}-\dot{y}) &= m_2 g + F \sin(2\pi f_0 t) \end{aligned}$$

ただし、 $k_2 y + c_2 \dot{y} < 0$ のとき、 $k_2 = c_2 = 0$

図-3 振動ローラ～地盤系の数値計算モデル

き換え，様々な地盤，機械条件における乱れ率と振動ローラ機械諸元（フレーム質量 m_1 (kg)，振動輪質量 m_2 (kg)，振動数 f_0 (Hz)，起振力 F (N))，および地盤変形係数 E の関係を数値計算により検討した．この結果，乱れ率と振動ローラ機械諸元，ならびに地盤変形係数の関係を式(2)のように定式化し（ ν はポアソン比），任意の機種に対しても振動ローラ加速度応答値（乱れ率）から直ちに地盤剛性を評価できる手法を提案している．

$$E = \frac{2 \cdot (1-\nu^2)}{B \cdot \pi} \cdot \frac{\left(\frac{4}{3} \text{乱れ率} + 1 \right)^2 \cdot (2\pi f_0)^2 \cdot m_2}{1 - 0.32\alpha + \sqrt{0.1024\alpha^2 - 1.64\alpha + 1}} \quad (2)$$

$$\alpha = 1 - \left(\frac{F}{(m_1 + m_2)g} \right)^2 \quad (3)$$

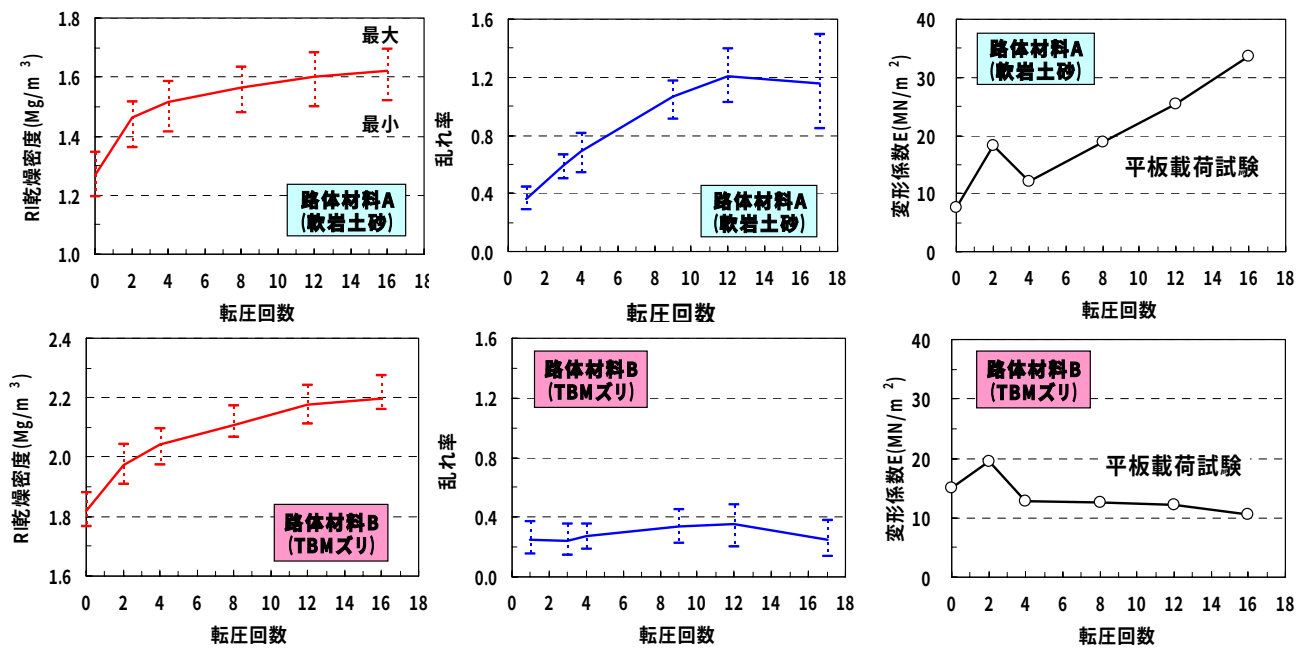


図-4 2種類の路体材料に対する転圧回数～RI 密度，乱れ率，平板載荷試験による変形係数の関係 (SV510D)

図-2の両機種の振動ローラ機械諸元を式(2)(3)に代入し，計測した乱れ率から地盤変形係数Eを各々評価した結果を図-2中に併記した．18t級ローラによる推定値 $E=32.3(\text{MN}/\text{m}^2)$ ，一方4t級ローラによる推定値 $E=34.7(\text{MN}/\text{m}^2)$ となっており，加速度応答値が大きく異なっているにもかかわらずほぼ同程度に地盤剛性を評価ができてることがわかる．本手法によれば，事前に試験施工を行って振動ローラ加速度応答と平板載荷試験による地盤剛性をキャリブレーションしておく必要がなく，非常に実務性が高いと言える．

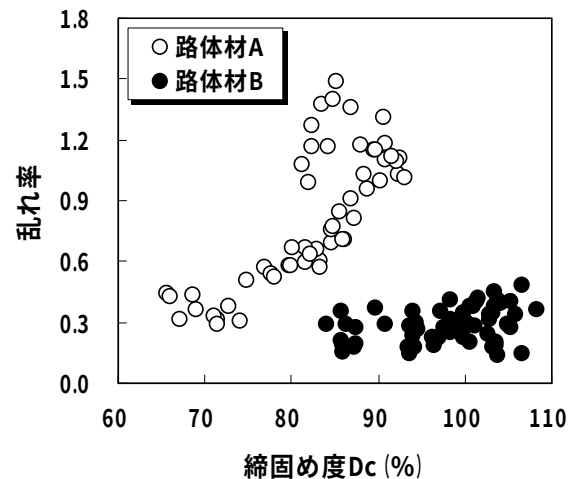


図-5 RI による締固め度～乱れ率の関係

3. 振動ローラ加速度法の締固め管理手法としての適用性

筆者らは，地盤の締固め指標として密度を評価するか，地盤剛性を評価するかによって，ローラ加速度法の適用範囲が異なることを明確にしている⁷⁾．これを以下に示す．

(1) 密度評価手法としての適用性

2種類の道路路体材料を用いて現場転圧試験を行い，RI 乾燥密度，乱れ率，平板載荷試験 (JIS A 1215) による地盤変形係数の転圧回数に対する傾向を調べた結果を図-4に示す．また，これを締固め度と乱れ率の関係に整理したものを図-5に示す．ここでの乱れ率は，振動ローラに搭載したデータロガーに加速度データを収録し，RI 測点直上での波形をパソコンで再現・抽出して後処理により求めたもので

ある．材料Aは軟岩土砂，材料Bはトンネルずりであるが，トンネルずりは搬出時にベルコン洗浄水によって人為的に多量に加水され，飽和度の高い状態で盛立てられていた．図-4を見ると，材料Aでは転圧回数に対し密度，乱れ率とも順調に増加するが，飽和度の高い材料Bを見ると，密度は転圧にともない増加するものの，乱れ率はほとんど変化していないことがわかる．また図-5の乱れ率～締固め度関係では，材料Aは良好な正の相関を有するものの，材料Bは密度の増加に対して乱れ率の変化は鈍感であり，乱れ率から密度を評価することは困難であることがわかる（実際の現場では両材料が混在して使用された）．転圧時，材料Bではウェーピングする状態が観察されていた．すなわち，地盤が高飽和度な状態

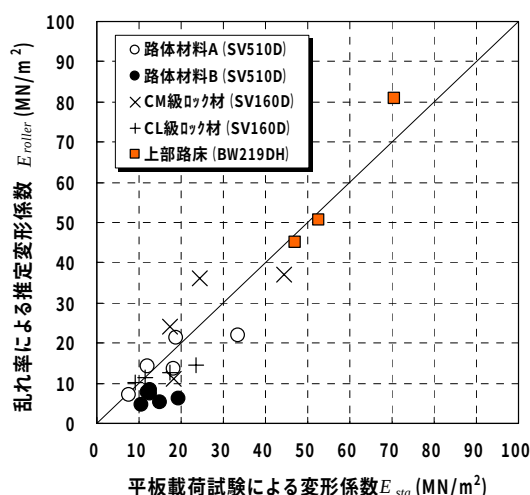


図-6 加速度による推定変形係数 E_{roller} と
平板載荷試験による実測変形係数 E の比較

にあるため転圧を行っても地盤からの反力が増加せず、このためローラ加速度応答（乱れ率）があまり変化しなかったものと推察される。同様の現象は、フィルダムコア材のような高含水比粘性土でも認められる。つまりこれらの高飽和度材料については、本手法は密度管理の代替手法としては適用が困難であり、実際には飽和度が低い粗粒土系で、かつ材料変動が小さい盛土に適用が限られると言える。

(2)地盤剛性評価手法としての適用性

一方、図-4を再び見ると、転圧にともなう乱れ率と平板載荷試験による変形係数は、材料A、Bとも各々良く対応していることがわかる。前出の式(2)(3)を用いて乱れ率から地盤変形係数を推定し、平板載荷試験による変形係数との関係に整理した結果を図-6に示す。図には、上記路体材料A、Bの他、道路路床材料、フィルダムロック材料など複数の材料の転圧試験結果もプロットした⁹⁾。なお、各現場の転圧機種は統一されていない（材料物性や機械諸元は文献9）参照）。図-6を見ると、高飽和度材料を含む多用な材料について、式(2)(3)による提案手法は平板載荷試験相当の地盤剛性を比較的精度良く評価していることがわかる。しかも、転圧機種を数種類用いているにもかかわらず1：1の関係になっており、機種が異なっても地盤剛性を適切に評価する式(2)(3)の妥当性を確認することができる。

以上のように、提案手法は任意の材料、任意の機種について地盤剛性を適切に評価可能であり、例えば道路・空港路床、宅地造成など、面的な地盤剛性確保が必要となる対象について、非常に適用性が高い手法と言える。

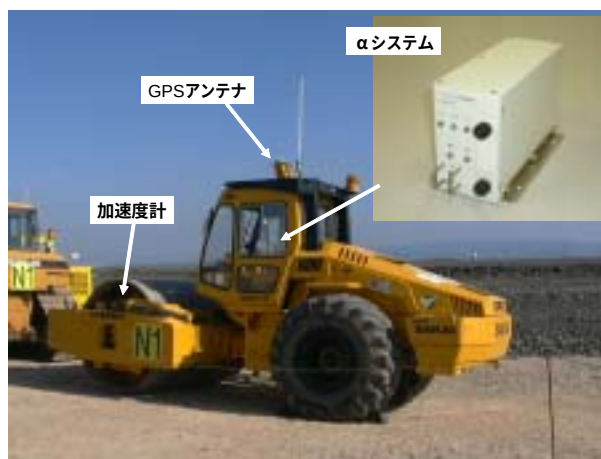


写真-1 振動ローラとαシステム外観

4. 振動ローラ加速度応答による地盤剛性評価装置（αシステム）の概要

以上の検討結果を踏まえ、加速度計測から地盤剛性の判定までを一括して自動で行う管理装置（αシステム）を開発した。本装置の外観を写真-1に示す。本装置は、取得した加速度データ、ならびに入力された機械諸元から、先述した手法によって乱れ率ならびに地盤変形係数 E を2.0秒毎に逐次算出する機構となっている。また、別途試験施工によって乱れ率～乾燥密度関係があらかじめ求まっておれば、この関数形を入力することで、密度の評価も行える仕組みとしている（ただし先述したように、材料変化をともしなう場合は密度とのキャリブレーションをやり直す必要がある）。

この他、本装置は①軽量かつコンパクト（W9cm×L20cm×H12cm、重さ3.0kg）であるため、振動ローラ運転席内でわずかな設置スペースしか取らない、②内部のCFカードに大量の取得データを確実に保存する、③GPSによる振動ローラ座標を取り込み、締固めの判定値（乱れ率、地盤変形係数、密度）と同期させて保存する、④無線LANを組み合わせることで、現場監督員が持つPDAやパソコン画面にリアルタイムに結果を表示することが可能、⑤振動ローラにノートPCを搭載することにより、RS232C経由で同様に平面的な結果をリアルタイム出力し、オペレータも地盤の締固めの合否確認しながら作業を行うことが可能、といった特徴を有している。GPSによる振動ローラ軌跡から転圧回数を判定し¹⁰⁾オペレータに確実な転圧を促しつつ、同時に監督員がローラ加速度により地盤品質の弱部をチェックしながら施工を行えば、工法・品質規定を同時に満たす合理的な締固め施工を達成することができる（図-7）。



図-7 車載 PC による転圧回数・地盤剛性のリアルタイム表示画面例と PDA による確認状況

5. 現場計測実験による α システムの検証

(1) 現場転圧試験によるシステムの検証

開発した α システムの適用性を検証するため、現場転圧試験を実施した。試験ヤード概要を図-8に示す。材料は最大粒径9.5mmのまさ土である。システムによる低剛性箇所の検出精度を検証するため、ヤード内には人為的に加水した高含水比ゾーンを作成した(RIによる初期密度、含水比を図-8中に併記した)。平板載荷試験、HFWDにより測定した地盤変形係数と管理装置の出力結果の比較例(転圧16回目におけるレーン方向地盤剛性分布)を図-9に示す。これより、管理装置が出力した変形係数 E は平板載荷試験、HFWDと良好に対応していること、特に高含水比ゾーンにて低剛性となっている状況を的確に捉えており、弱部の検出手段として高い適用性を有することがわかった。また、無線LANを介して数十m離れた場所からの遠隔操作もスムーズに行え、実用的な現場管理システムとしての現場適用性も確認できたことも付記しておく。

(2) 実道路路床計測による検証

路床まで完成した高速道路現場にて、延長約300mにわたって α システムにより路床の地盤変形係数を計測した結果を図-10に示す¹¹⁾。図は同一レーン上を往復した際の振動ローラ前後進で測定した結果を

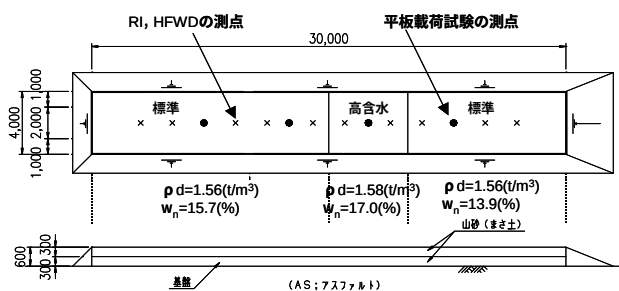


図-8 α システム検証転圧試験ヤード概要

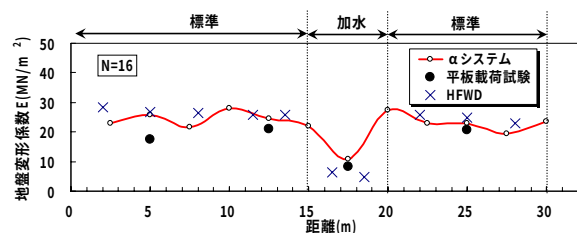


図-9 α システムによる地盤剛性判定結果

示しているが、前後進での剛性の凹凸は良く一致しており、測定値の再現性を確認することができる。また、盛土部に比べ切土部の路床剛性が圧倒的に大きいことを含め、路床剛性の強弱を非常に詳細かつ的確に捉えており、プルーフローリングの代替にも適用可能であることが伺える。さらに、本システムによって取得した路床剛性の詳細分布を用いれば、剛性の強弱に応じて区間毎に舗装を最適な厚さに設

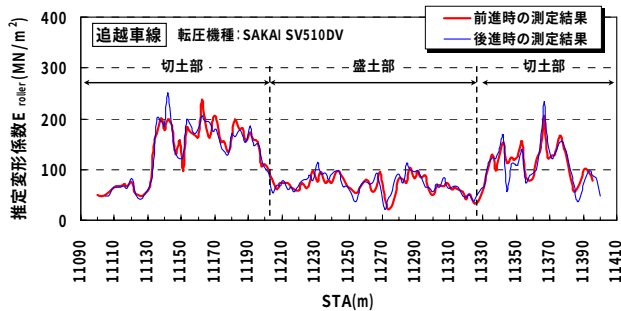


図-10 実路床におけるαシステムによる剛性測定結果

定することも不可能ではなく、舗装構造の合理化にも寄与できると言える。

6. まとめ

面的かつリアルタイムな締固め管理手法として、近年改めて脚光を浴びつつある振動ローラ加速度法について、筆者らがこれまで蓄積した適用性の検討結果を述べるとともに、本手法を用いた地盤剛性評価装置「αシステム」の概要について報告した。αシステムは現在、関西国際空港2期空港島、および神戸空港の路体・路床造成工事において、RIを補完し広大な転圧面を合理的かつ高精度に管理する手法として既に実工事での適用を図っており、順調に稼働しているところである。

ローラ加速度法の最大の特徴は、手間のかかる現場品質管理試験を単に省力化するだけでなく、3次元の品質情報を詳細かつ迅速に取得できることであろう。近年の性能規定化の流れは土構造物でも例外ではなく、要求水準が純粋に性能で規定される場合、土構造物のパフォーマンス（例えば外力に対する変形量など）を定量的に評価する手段がますます重要になってくる。この場合、力学挙動を精度良く評価する解析手法の発達は勿論だが、構築された土構造物の品質を施工段階で詳細に評価し、設計で想定したパフォーマンスを満足しない場合は速やかに対処できる現場管理手法の発展も同様に重要である。その意味で、盛土の地盤剛性分布を詳細に把握し、その過不足をリアルタイムに判定して追加転圧により迅速に対処できる本提案手法は、次代の性能規定化にも対応し得る管理手法と言える。さらに、施工時の空間的な品質情報（例えば場所による強弱）をデータベース化して維持管理段階に受け渡せば、施工～維持管理を一体的に考えた効果的な戦略にも活用することができよう。本報告で取り上げたローラ

加速度法のような3次元の品質情報の取得手段と近年のITツールの発達とは、単なる現場管理の省力化にとどまらず、将来の性能規定化に不可欠な施工管理ツールとなり得ることを強調しておきたい。

参考文献

- 1) Turner, H. and Sandstrom, A.: A New Device For Instant Compaction Control, Proceedings International Conference on Compaction, vol.2, pp.611~614, 1980.
- 2) Floss, R., Gruber, N. and Obermayer, J.: A Dynamical Test Method For Continuous Compaction Control, Proceedings of the 8th European Conference on Soil and Foundation Engineering, vol.1, pp.25~30, 1983.
- 3) 嶋津晃臣, 見波 潔, 中田公基, 嶋田 功, 足立賢一: 振動ローラによる盛土の締固めに関する調査, 土木研究所資料第2184号, pp.37~76, 1985.
- 4) 藤井弘章, 渡辺 忠: 種々の締固め管理方法の比較, 第21回土質工学研究発表会講演集, pp.1771~1774, 1986.
- 5) Research Society for Road and Traffic: Technical Testing Instructions for Soil and Rock in Road Construction, TP BF-StB Part E2, Surface Covering Dynamic Compaction Test, 1994.
- 6) 藤山哲雄, 建山和由: 振動ローラの加速度応答を利用した転圧地盤の剛性評価手法, 土木学会論文集 No.652/III-51, pp.115~123, 2000.
- 7) 藤山哲雄, 益村公人, 建山和由, 石黒 健, 三嶋信雄: 種々の土質条件に対するローラ加速度応答法の締固め管理への適用性, 土木学会論文集 No.701/III-58, pp.169~179, 2002.
- 8) 古屋 弘, 藤原宗一: 加速度センサーとGPSを組み合わせた締固め管理システムの開発, 土と基礎Vol.48 No.507, pp.21~24, 2000.
- 9) 横田聖哉, 益村公人, 藤山哲雄, 石黒 健: 道路路床の施工管理の合理化に関する考察ー(その1)ローラ加速度応答を利用した剛性評価手法の適用性ー, 第37回地盤工学研究発表会講演集, 2002.
- 10) 三嶋信雄, 緒方健治, 北村佳則, 益村公人: GPSを利用した土の締固め自動管理手法の導入, 土と基礎Vol.48 No.507, pp.9~12, 2000.
- 11) 藤岡一頼, 北村佳則, 中島 聡, 西尾貴司, 内山恵一, 高橋 浩, 古屋 弘, 浜崎充良: ローラ加速度応答法を用いた道路路床の品質管理に関する研究(その1), 第39回地盤工学研究発表会, pp.1343~1344, 2004.